

# ニチアスにおける断熱材の高温熱伝導率測定

研究開発本部 浜松研究所 阿部直毅

## 1. はじめに

ニチアスの「断つ・保つ」技術要素のひとつである「断熱」技術は、世界規模で高まりをみせる省エネルギー化やCO<sub>2</sub>排出量削減などの課題に対して大きな役割を担う技術である。当社は断熱材メーカーとして図1に示す通り、極低温から1500℃を超える高温域で使用される断熱材をラインアップし、幅広い業界で「断熱」技術を支え

てきた。本稿の主題である熱伝導率はこれら製品の性能を示す指標である。

熱伝導率とは材料内部の熱の伝わりやすさを示す材料特性であり、熱伝導率が低いものほど熱が伝わり難い、つまり断熱性能が高いことを示す。断熱材メーカーだけでなく、ユーザーにとっても製品評価や熱設計を行う場面において、熱伝導率はなくてはならない材料特性である。

熱伝導率は断熱材を構成する材質が同じであっ



図1 当社の主な断熱材製品

でも、骨格となる材料の形状や結晶状態、空隙の占有比率やサイズなど、構造の微細な違いによって変化する。また、温度などの使用環境にも大きな影響を受けるため、製品や仕様ごと、使用環境に合わせた適切な測定が求められる。

幅広い断熱材ラインアップを持つ当社では、研究開発から品質管理まで、すべてのステージで重要な材料特性となる熱伝導率に関して、その測定環境を拡充してきた。当社には、プラントや工業炉など、高温域で使用される断熱材の要求が多くよせられる。また、航空宇宙分野などからは真空下で使用される断熱材の要求もあるため、さまざまな熱伝導率測定環境に対応できる体制を整えている。

本稿では、当社における高温熱伝導率測定に関して測定事例を添えて紹介する。

## 2. 高温熱伝導率測定方法と原理

### 2.1 当社における高温熱伝導率測定

熱伝導率の測定方法は、定常法と非定常法に大別される。一般的な測定方法を図2に示す<sup>1)</sup>。

定常法とは、試験体に一次元方向の定常熱流を与え、試験体の温度勾配から熱伝導率を直接求める方法である。これに対して非定常法は、試験体を加熱した際の温度変化から主に熱拡散率を求める。試験体の比熱と密度と熱拡散率の積から熱伝導率を間接的に求める方法である。

当社の熱伝導率測定は、保護熱板法 (Guarded

Hot Plate method, 以下GHP法)、熱流計法、周期加熱法、熱線法の4種の手法を用いている。それぞれ、特徴に合わせて使い分けをしているが、特に高温での熱伝導率測定に広く活用されているGHP法と周期加熱法について、その利用法と簡単な測定原理を説明する。

### 2.2 保護熱板法 (GHP法)

GHP法は断熱材の熱伝導率測定方法として国際的に規格化されている絶対法である。当社でも、ロックウールやけい酸カルシウム板といった汎用断熱材をはじめとした、幅広い高温断熱材製品の測定に利用している。しかしながら、当社の装置では試験体サイズが大きい (300mm φ)、常用の測定上限温度が600℃であるなど制約も多く、製品の品質管理には好適だが、研究開発用途には不向きな面もある測定法である。

[測定原理]

GHP法は、平板試験体の厚さ  $d$  [m] 方向に一次元定常熱流を与え、その時の熱流量  $Q$  [W]、熱流面積  $S$  [m<sup>2</sup>]、試験体の厚さ方向の温度差  $\Delta\theta$  [℃] から、熱伝導率  $\lambda$  [W/(m・K)] を (1) 式より求める方法である。

$$\lambda = \frac{Q \cdot d}{S \cdot \Delta\theta} \quad (1)$$

GHP法には試験体2枚方式と1枚方式があるが、標準的な2枚方式の模式図を図3に示す。(1) 式に示した熱流量  $Q$  は、加熱板 (主熱板) の発熱量から求めるため、ここで発生した熱は、冷却熱板

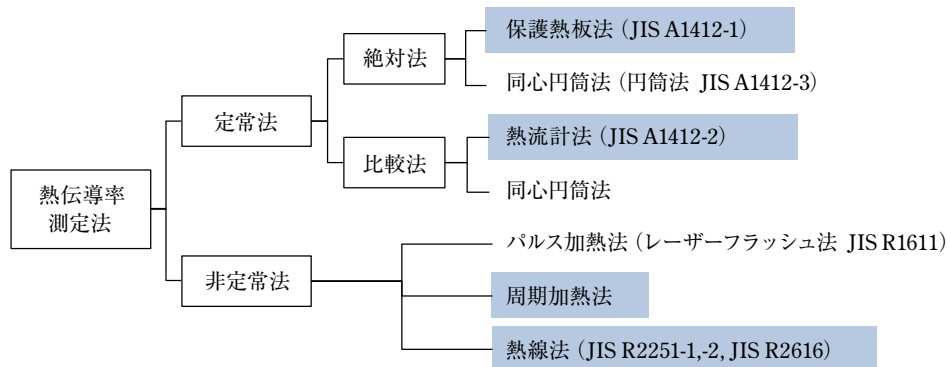


図2 一般的な熱伝導率測定方法

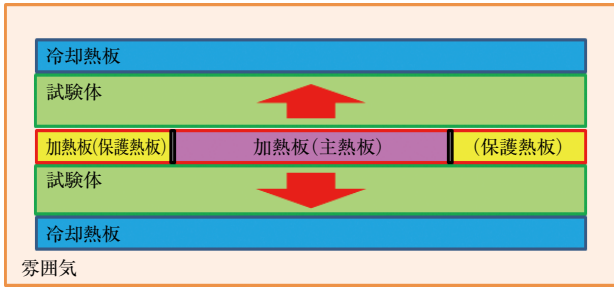


図3 GHP法の模式図 (2枚方式)

方向への一次元熱流であることが求められる。加熱板（主熱板）から側面方向への熱流の拡散を防ぐために、加熱板（主熱板）の周囲に同じ温度に制御された加熱板（保護熱板：Guarded Hot Plate）を配しているのが本装置の特徴である。

### 2.3 周期加熱法

金属の熱物性測定に古くから用いられてきた周期加熱法の原理を応用して、当社は断熱材のような多孔質材料の測定ができる装置を独自開発した。本装置では、GHP法の測定限界を超えた高温域の測定や、研究開発用途に適した小サイズの試験体の測定も可能とした。また、装置構造を単純化することにより、真空下における測定など、拡張性も高い装置となっている。次章では本測定法の測定事例についても紹介する。

#### [測定原理]

周期加熱法の模式図と温度波形を図4に示す。

周期加熱法では、試験体の上下面にヒーターを

設置し、上部ヒーターにより厚さ方向に周期的な温度変動を与え、下部ヒーターにより下面を一定温度に制御する。この時、試験体上面から中間面に温度変動が伝播する際、位相差（時間差）を生じる。周期加熱法では、この位相差から熱拡散率を求め、別途求めた比熱と密度との積から熱伝導率を算出する。

試験体の全体厚さを  $d$  [m]、下側の試験体厚さを  $x$  [m] とすると、位相差  $\phi$  [rad] は、次式で表される。

$$\phi = \arg \left\{ \frac{\sinh \kappa x (1+i)}{\sinh \kappa d (1+i)} \right\} \quad (2)$$

$$\kappa = \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \quad (3)$$

ここで、 $\kappa$  [ $\text{m}^{-1}$ ] は減衰係数、 $i$  は虚数であり、 $\omega$  [ $\text{s}^{-1}$ ] は角振動数、 $a$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] は熱拡散率である。 $f$  [s] を周期とすると、 $\omega$  は次式で表される<sup>2)</sup>。

$$\omega = \frac{2\pi}{f} \quad (4)$$

以上から、測定した位相差を (2) 式に代入することで減衰係数を求め、(3) 式に代入して熱拡散率を得る<sup>3)</sup>。さらに熱伝導率  $\lambda$  [ $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ] を (5) 式から求める。 $c$  [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ] は比熱、 $\rho$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] は密度である。

$$\lambda = \rho \cdot c \cdot a \quad (5)$$

当社が保有するGHP法装置と周期加熱法装置の特徴を表1にまとめて示す。測定の目的や用途、材料などから適切な測定方法を選定している。

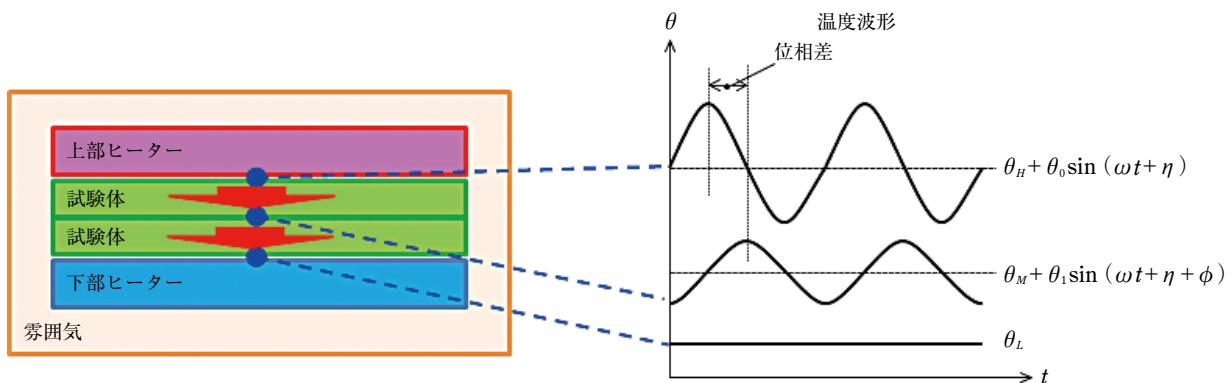


図4 周期加熱法の模式図と温度波形

表1 当社のGHP法装置と周期加熱法装置の特徴

測定方法		GHP法	周期加熱法
規格	JIS	A 1412-1	-
	ISO	8302	ISO/WD21901*
	ASTM	C177	-
測定温度範囲 (常用)	[°C]	~ 600	~ 1000
雰囲気圧力	大気圧下	○	○
	真空下	×	○
試験体サイズ	[mm]	300 φ	□ 125 × 125 □ 300 × 300
測定熱伝導率範囲	[W/(m・K)]	~ 0.2	~ 2.0
主に適用される試験体		ロックウール製品 けい酸カルシウム板	高温耐熱ボード 低熱伝導ボード

※ (一財) 建材試験センターが中心となり測定方法の国際標準化を推進中

### 3. 当社における高温熱伝導率の測定例

本章では独自開発した周期加熱法装置による測定例を紹介する。GHP法では測定範囲外となる1000°Cまでの高温域における測定と、拡張事例として真空下での測定結果を示し、そこから得られる情報の有用性について解説する。

#### 3.1 高温耐熱ボードの測定例

高温熱伝導率の測定例で使用した、当社の高温耐熱ボードXおよびY (以下、ボードXおよびボードY) の概要を表2に示す。

2種類の試験体は構成材料が同じであるが、配合比率を変えることで異なる密度になっている。本試験体の100 ~ 600°CにおけるGHP法および200 ~ 1000°Cにおける周期加熱法による熱伝導率測定結果を図5に示す。

各試験体について、GHP法と周期加熱法による

測定結果を比較すると、GHP法の上限温度である600°Cまでは両装置による熱伝導率はほぼ一致している。周期加熱法でさらに高温まで測定した結果を見ると、試験体2種類の熱伝導率が800°C以上で高低逆転していることが観察できる。

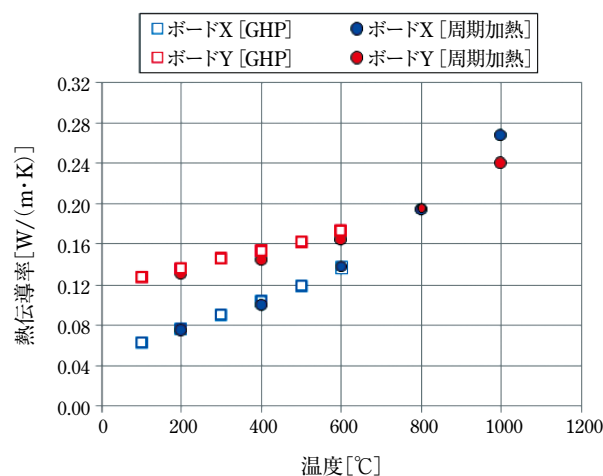


図5 高温耐熱ボードの熱伝導率

表2 試験体の概要

名称		ボードX	ボードY
構成材料		アルミナファイバー アルミナ粉末 有機および無機バインダー	同左
高密度 [kg/m <sup>3</sup> ]		200	400
空隙/固体の体積比率 [%]		95 / 5	90 / 10
サイズ [mm]	GHP法	300 φ, 25 <sup>t</sup> (2枚)	同左
	周期加熱法	300 × 300, 25 <sup>t</sup> (2枚)	同左

これは2つの耐熱ボードの密度差から、ふく射伝熱の上昇傾向に差異を生じたことによる現象であるが、断熱材では、このような温度域で熱伝導率が逆転する事例は多く見受けられる。本装置を用いて広い温度域を測定できることは、温度で変化する熱伝導率の挙動を的確に捉え、確度の高い製品選定や熱設計につながる有用な情報が得られる。当社ではさらなる高温域の測定を目指して測定法の研究を進めている。

### 3.2 周期加熱法による真空下における測定例

近年、航空宇宙に代表される特殊な産業分野から、真空下における高温熱伝導率の測定要求がよせられている。この要求に応えることは、単にお客様からの直接的なニーズに応えるだけでなく、当社の断熱材開発に大きな役割を果たしていることを紹介する。

測定例として、前述のボードXの大気圧下および真空下（10Pa）における熱伝導率測定結果を図6に示す。本測定では、前述した装置とは異なり、125×125×10<sup>4</sup>mmの試験体を2枚使用し、同一試験体で圧力条件のみを変更している。

ボードXの真空下の熱伝導率は、大気圧下に比べ200℃で70%、1000℃では40%低下している。

このように、真空下では気体伝導伝熱が排除されるため大気圧下に対して熱伝導率が低下することは一般的にもよく知られた現象である。当社ではこの測定結果をもとに、断熱材の各伝熱要素を

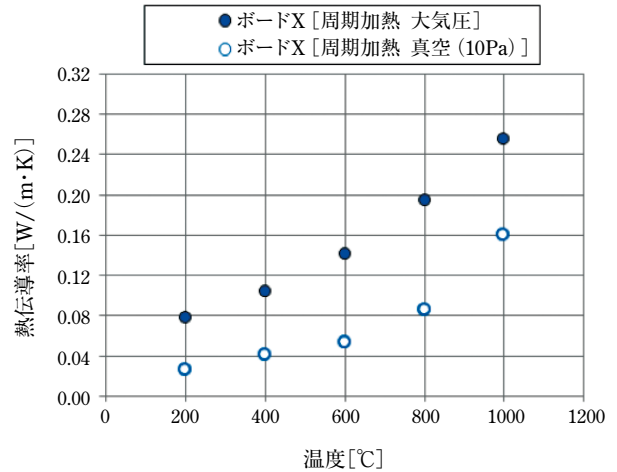


図6 大気圧下および真空下における熱伝導率の測定例

切り分けて近似式化することにより、断熱材の設計に活用している。

まず、断熱材における伝熱要素を図7に示す<sup>4)</sup>。

断熱材の伝熱は、固体伝導、気体伝導およびふく射による伝熱の総和である。したがって、断熱材の熱伝導率 $\lambda$ は次式で表される。

$$\lambda = \lambda_s + \lambda_g + \lambda_r \quad (6)$$

ここで、 $\lambda_s$ は固体伝導、 $\lambda_g$ は気体伝導、 $\lambda_r$ はふく射による伝熱に由来する熱伝導率を示している。当社では、固体伝導とふく射の伝熱要素のみを抽出した真空下の熱伝導率測定データから(6)式を基に、断熱材の熱伝導率の近似式を導出している<sup>5)</sup>。

$$\lambda = A\rho + \lambda_g + \frac{B}{\rho} T^3 \quad (7)$$

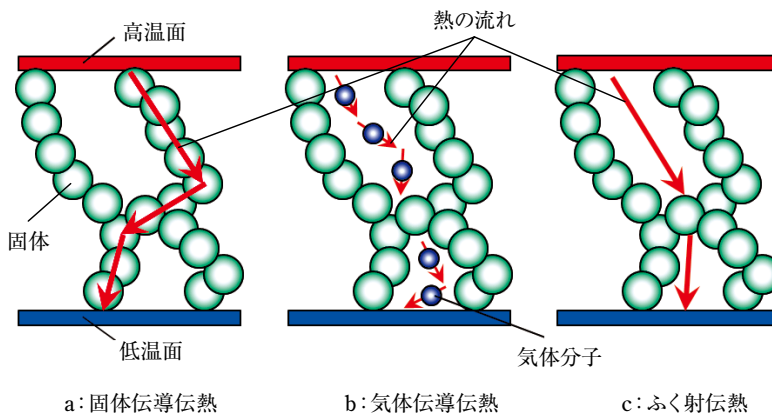


図7 断熱材における伝熱要素

(7) 式の右辺第1項, 第2項および第3項は, (6) 式の各項に対応する熱伝導率を表す。Aは固体伝導熱に関する係数, Bはふく射伝熱に関する係数,  $\rho$ は密度 [kg/m<sup>3</sup>], Tは絶対温度 [K] である。

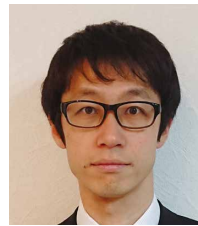
(7) 式の近似式を使って各伝熱要素それぞれの温度依存性を把握することは, 断熱材の最適な材料や構造を決定する上で有益な情報を与えてくれるものである。当社における熱伝導率測定は, 断熱材の設計や開発を下支えする役割も果たしている。

## 4. おわりに

当社では, 熱伝導率測定に関して, 測定精度の向上, 測定範囲の拡大などの研究に継続的に取り組んできた。今後もこの研究を加速させ, 熱伝導率測定を通して当社の断熱材開発や生産に寄与し, さらにお客様の断熱技術をサポートしていく所存である。

## 参考文献

- 1) 熱物性値測定法, 養賢堂, 日本機械学会, 1991, P2.
- 2) H. S. Carslaw, J. C. Jaeger: Conduction of Heat in Solids, OXFORD 105-106 (1959).
- 3) 大村: 周期加熱法の低温下における熱伝導率測定への応用, ニチアス技術時報, 365, 20-24 (2014).
- 4) 安藤, 大利: 断熱材低熱伝導化のためのふく射散乱材設計技術, ニチアス技術時報, 371, 5-8 (2015).
- 5) 大村, 坪井, 小野寺, 富村, 繊維質断熱材の有効熱伝導率に関する研究, 九州大学機能物質科学研究書報告, 16, 13-17 (2002).



阿部 直毅

研究開発本部 浜松研究所  
断熱材の熱伝導測定に関する研究に従事

## 特化則<sup>※</sup>適用対象外の耐熱性に優れたウール

アルカリアースシリケート (AES) ウール

# ファインフレックス BIO<sup>®</sup>

ファインフレックスBIO <sup>®</sup> バルク	ファインフレックスBIO <sup>®</sup> 紡織品
ファインフレックスBIO <sup>®</sup> ブランケット	(クロス、テープ、コード、ツイストロープ、ブレードロープ)
ファインフレックスBIO <sup>®</sup> LTブランケット	ファインフレックスBIO <sup>®</sup> ボード
ファインフレックスBIO <sup>®</sup> ペーパー-A/R/M	ファインフレックスBIO <sup>®</sup> モールド
ファインフレックスBIO <sup>®</sup> キャスト	



 ニチアス

※特化則: 特定化学物質障害予防規則

※「ファインフレックスBIO」はニチアス(株)の登録商標です。